

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetiky**

**Vliv zapojení vzduchových ventilátorů kotle s roštovým ohništěm  
na velikost vlastní spotřeby**

**Effect of Air Fans Involvement of the Boiler with Grate Furnace  
to the Size of their own Consumption**

**Student:**

**Bartoš Lukáš**

**Vedoucí bakalářské práce:**

**doc. Ing. Vilimec Ladislav**

**Ostrava 2012**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Bartoš**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma: Vliv zapojení vzduchových ventilátorů kotle s roštovým ohništěm na velikost vlastní spotřeby  
Effect of Air Fans Involvement of the Boiler with Grate Furnace to the Size of their own Consumption

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši zaměřenou na kotle s roštovým ohništěm.
2. Navrhněte výpočtové schéma kotle.
3. Určete stechiometrii, výrobní teplo, účinnost a spotřebu paliva.
4. Vypracujte schéma zapojení vzduchových ventilátorů.
5. Stanovte parametry pro návrh ventilátorů.
6. Proveďte analýzu vybraného řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

[www.fs.vsb.cz/euprojekty/414](http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414)

VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008.

ISBN 978-80-248-1853-5.


DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 1999. ISBN 80-01-02035-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

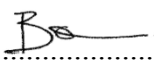


  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2012


  
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Bartoš

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Krestova 1409/2, Ostrava, 70030

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

BARTOŠ, L. *Vliv zapojení vzduchových ventilátorů kotle s roštovým ohništěm na velikost vlastní spotřeby : bakalářská práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 52 s. Vedoucí práce: Vilimec, L.

Bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou druhů zapojení vzduchových ventilátorů bez sekundárního vzduchu a se sekundárním vzduchem z hlediska spotřeby elektrické energie. Teoretickou část tvoří rešerše zaměřená na kotle s roštovými ohništi a základní informace o vzduchových ventilátorech. Výpočtová část je tvořena stechiometrickými rovnicemi. Poslední oblast se zaměřuje na závěrečné srovnání dvou druhů zapojení vzduchových ventilátorů, kde ze zadaných parametrů vzduchových ventilátorů je vypočtena celková spotřeba elektrické energie.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

BARTOŠ, L. *Effect of Air Fans Involvement of the Boiler with Grate Furnace to the Size of their own Consumption : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2012, 52 p. Thesis head: Vilimec, L.

Bachelor thesis presents a comparison of two types of air fan involvement without secondary air and secondary air in terms of power consumption. The theoretical part consists of research focused on the boiler grate furnace and basic information about air fan. The calculation part consists of stoichiometric equations. The last area focuses on the final comparison of two types of air fan involvement and there is the total energy consumption calculated by the parameters of the specified air fan.

## Obsah

Přehled veličin: .....	9
Zadané výpočtové parametry .....	12
0 Úvod .....	14
1 Kotle pro spalování tuhých paliv .....	15
1.1 Kotle s roštovým ohništěm.....	15
1.1.1 Kotle s pevným roštem .....	16
1.1.2 Kotle s mechanickým roštem.....	17
1.1.3 Vratisuvný rošt.....	18
2 Ventilátory .....	18
2.1 Radiální ventilátor .....	19
2.2 Axiální ventilátor .....	19
3 Základní výpočty .....	20
4 Výpočet výrobního tepla kotle.....	25
4.1 Schéma kotle .....	26
4.2 Entalpie napájecí vody .....	26
4.3 Entalpie přehřáté páry .....	27
4.4 Entalpie odluhu .....	27
4.5 Množství odluhu.....	27
5 Výrobní teplo .....	28
6 Měrná tepelná kapacita spalin .....	28
7 Tepelné ztráty kotle .....	29
7.1 Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce .....	29
7.2 Ztráta mechanickým nedopalem v popílku .....	30
7.3 Celková ztráta mechanickým nedopalem.....	30
7.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků .....	30
7.4.1 Ztráta fyzickým teplem ve strusce .....	31

7.4.2	Ztráta fyzickým teplem v popítku.....	31
7.4.3	Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků .....	32
7.5	Ztráta citelným teplem spalin.....	32
7.6	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí .....	33
7.7	Ztráta chemickým nedopalem.....	33
8	Účinnost kotle.....	33
9	Množství paliva .....	34
9.1	Skutečné množství paliva.....	34
9.2	Množství spáleného paliva.....	34
10	Parametry pro návrh ventilátorů .....	35
11	Zapojení bez sekundárního vzduchového ventilátoru .....	37
11.1	Tlak primárního ventilátoru .....	38
11.2	Celkový přebytek vzduchu za kotlem .....	38
11.3	Množství vzduchu u primárního ventilátoru .....	39
11.4	Výkon primárního ventilátoru.....	39
11.5	Instalovaný příkon primárního ventilátoru.....	40
11.6	Příkon primárního ventilátoru .....	40
11.7	Roční spotřeba elektrické energie primárního ventilátoru .....	41
12	Zapojení se sekundárním vzduchovým ventilátorem .....	41
12.1	Tlak primárního ventilátoru .....	42
12.2	Tlak sekundárního ventilátoru.....	42
12.3	Množství vzduchu u primárního ventilátoru .....	43
12.4	Množství vzduchu u sekundárního ventilátoru .....	43
12.5	Výkon primárního ventilátoru.....	44
12.6	Výkon sekundárního ventilátoru .....	44
12.7	Instalovaný příkon primárního ventilátoru.....	45
12.8	Instalovaný příkon sekundárního ventilátoru.....	45

12.9	Příkon primárního ventilátoru .....	46
12.10	Příkon sekundárního ventilátoru.....	46
12.11	Roční spotřeba elektrické energie primárního ventilátoru .....	47
12.12	Roční spotřeba elektrické energie sekundárního ventilátoru.....	47
13	Analýza .....	48
14	Závěr .....	50
15	Seznam použité literatury .....	52



## Přehled veličin:

$M_{\text{PAL}}$	Skutečné množství paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$M_{\text{PV}}$	Množství spáleného paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$P$	Výkon ventilátoru	$[\text{kW}]$
$P_{\text{P}}$	Instalovaný příkon ventilátoru	$[\text{kW}]$
$P_{\text{P}*}$	Příkon ventilátoru	$[\text{kW}]$
$Q_{\text{V}}$	Výrobní teplo	$[\text{kJ}]$
$Q_{\text{i}}$	Redukovaná výhřevnost paliva	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{CO}_2}$	Objem oxidu uhličitého	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{H}_2\text{O}}$	Objem vodní páry	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{N}_2}$	Objem dusíku	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{O}_2}$	Objem kyslíku	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{O}_2\text{min}}$	Minimální objem kyslíku	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{SO}_2}$	Objem oxidu siřičitého	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{SPS}}$	Objem suchých spalín	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{SPV}}$	Objem vlhkých spalín	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{SPV}}^{\text{tSP}}$	Objem vlhkých spalín z 1 kg paliva při 165°C	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{VZS}}$	Objem vzduchu skutečného suchého	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{VZSmin}}$	Stechiometrické množství suchého vzduchu	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{VZV}}$	Objem vzduchu skutečného vlhkého	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V_{\text{VZVmin}}$	Stechiometrické množství vlhkého vzduchu	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$V$	Množství vzduchu ventilátoru	$[\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$W$	Spotřeba elektrické energie	$[\text{kWh}]$
$Z_{\text{C}}$	Celková ztráta mechanickým nedopalem	$[-]$
$Z_{\text{CO}}$	Ztráta chemickým nedopalem	$[-]$
$Z_{\text{Cstr}}$	Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce	$[-]$
$Z_{\text{Cpop}}$	Ztráta mechanickým nedopalem v popílku	$[-]$
$Z_{\text{f}}$	Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$[-]$
$Z_{\text{fstr}}$	Ztráta fyzickým teplem ve strusce	$[-]$

$Z_{f_{pop}}$	Ztráta fyzickým teplem v popílku	[–]
$Z_k$	Ztráta citelným teplem spalin	[–]
$Z_{SV}$	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	[–]
$c_{pCO_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pH_2O}$	Měrná tepelná kapacita vodní páry	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pN_2}$	Měrná tepelná kapacita dusíku	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pO_2}$	Měrná tepelná kapacita kyslíku	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pSO_2}$	Měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{pop}$	Měrná tepelná kapacita popílku	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{psk}$	Měrná tepelná kapacita škváry	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{psp}$	Měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{str}$	Měrná tepelná kapacita strusky	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$i_{NV}$	Entalpie napájecí vody	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$i_o$	Entalpie odluhu	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$i_{pp}$	Entalpie přehřáté páry	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$t_{SP}$	Teplota spalin	$[^{\circ}C]$
$t_o$	Teplota okolí	$[^{\circ}C]$
$\alpha_0$	Přebytek vzduchu na konci spalovací komory	[–]
$\alpha_{V1}$	Množství dopravovaného vzduchu	[–]
$\Delta\alpha_0$	Přísátí vzduchu do spalovací komory	[–]
$\Delta\alpha_p$	Ztráta vzduchu v potrubí	[–]
$\Delta p_{VI}$	Zvýšení tlaku primárního ventilátoru	$[kPa]$
$\eta_K$	Celková účinnost kotle	$[\%]$
$\omega_{CO_2}$	Koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách	$[\%]$
$\omega_{H_2O}$	Koncentrace vody ve spalinách	$[\%]$
$\omega_{N_2}$	Koncentrace dusíku ve spalinách	$[\%]$
$\omega_{O_2}$	Koncentrace kyslíku ve spalinách	$[\%]$

$\omega_{\text{SO}_2}$	Koncentrace oxidu siřičitého ve spalínách	[%]
$\dot{m}_O$	Množství odluhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{\text{pp}}$	Hmotnostní průtok přehřáté páry	$[\text{k}] \cdot \text{s}^{-1}]$

## Zadané výpočtové parametry

Prvkový rozbor surového vzorku černého uhlí (Polsko)

$$C^r = 55,9 \quad [\%]$$

$$H^r = 3,2 \quad [\%]$$

$$N^r = 0,67 \quad [\%]$$

$$S^r = 0,85 \quad [\%]$$

$$O_2^r = 4,38 \quad [\%]$$

$$A^r = 26 \quad [\%]$$

$$W^r = 9 \quad [\%]$$

$$\Sigma 100 \quad [\%]$$

### Výhřevnost paliva

$$Q_i^r = 20,048 \quad [\text{MJ}]$$

### Výhřevnost hořlaviny

$$Q_{ci} = 32600 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### Výkon kotle

$$m_p = 50 \quad [\text{t/h}]$$

### Napájecí voda/pára (teplota, tlak)

$$t_{NV} = 120 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$p_{NV} = 70 \quad [\text{bar}]$$

$$t_p = 500 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$p_p = 70 \quad [\text{bar}]$$

### Odluh

$$\sigma = 4 \quad [\%]$$

### Přebytek vzduchu ve spalovací komoře

$$\alpha_0 = 1,31 \quad [-]$$

### Přebytek vzduchu za kotlem

$$\alpha_K = 1,41 \quad [-]$$

### Teplota spalin

$$t_{SP} = 165 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

### Teplota strusky

$$t_{str} = 600 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

**Teplota okolí:**

$$t_o = 165 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

**Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti:**

$$v = 1,03 \quad [-]$$

**Podíl popela ve strusce**

$$X_{\text{str}} = 75 \quad [\%]$$

$$C_{\text{str}} = 18 \quad [\%]$$

**Podíl popela z celkového množství v palivu**

$$X_{\text{POP}} = 25 \quad [\%]$$

$$C_{\text{POP}} = 25 \quad [\%]$$

## 0 Úvod

Předmětem řešení bakalářské práce je porovnání dvou druhů řazení vzduchových ventilátorů u kotle s roštovým ohništěm. Jedná se o zapojení se sekundárním ventilátorem a bez sekundárního ventilátoru.

První část týkající se rešerše se zaměřením na kotle s roštovými ohništi a jejich následné dělení je rozšířena i na funkci ventilátorů a bližší popis radiálního a axiálního ventilátoru.

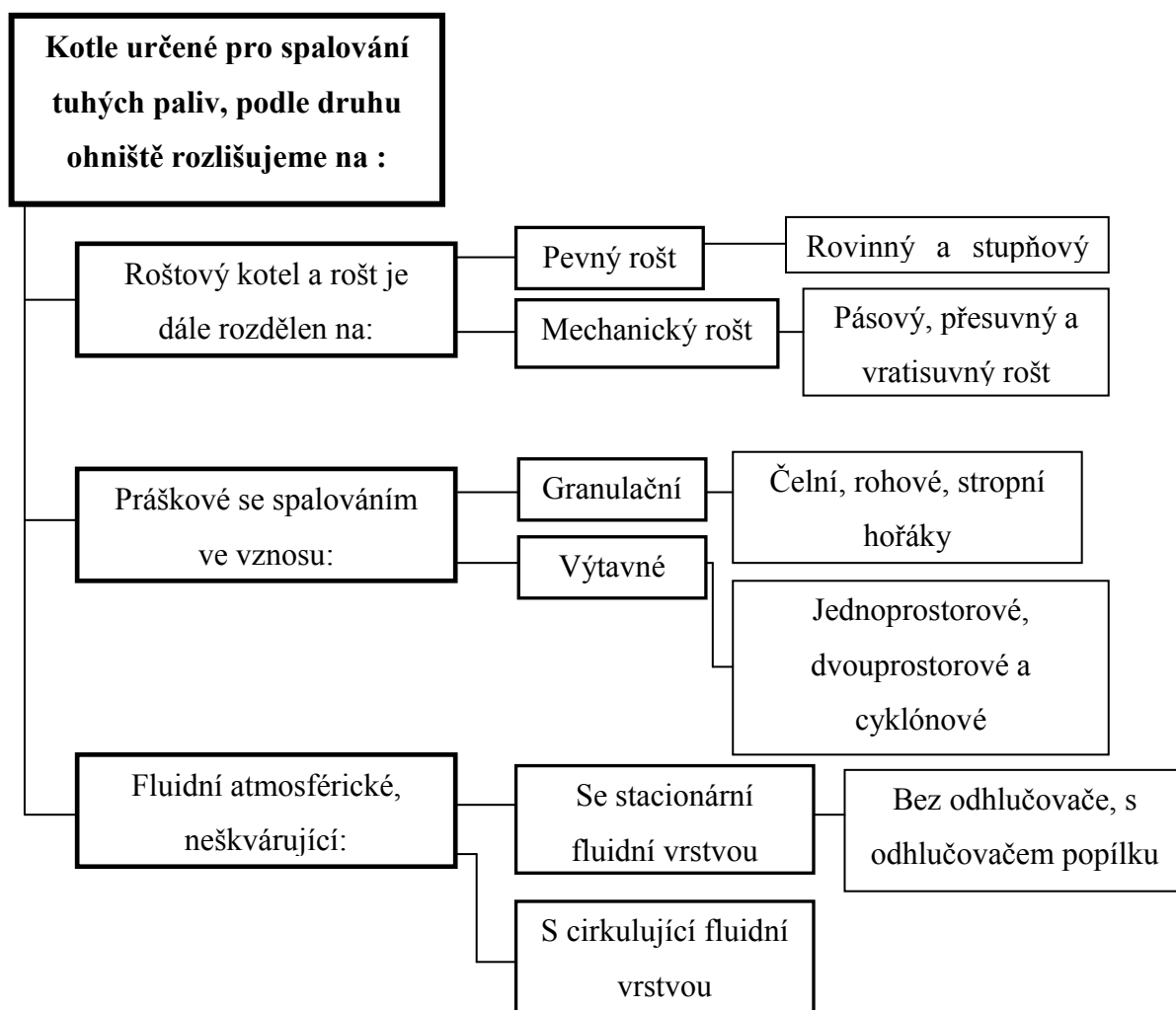
Další oblastí je výpočet účinnosti kotle konstruovaného bez ohříváku vzduchu, tvořeného membránovými stěnami a utěsněným roštěm, aby zde nedocházelo k falešnému nasátí vzduchu.

Finální částí je srovnání velikostí spotřebované elektrické energie těchto dvou druhů zapojení.

# 1 Kotle pro spalování tuhých paliv

Většina informací z této kapitoly byla čerpána z literatury [1], [2] a [4].

Kotle je možno rozčlenit do několika základních skupin a to z hlediska provedení ohniště a způsobu spalování.



## 1.1 Kotle s roštovým ohništěm

Hlavním a konstrukčně nejjednodušším způsobem určeným pro spalování tuhých paliv je spalování, které probíhá na roštu kotle. Tyto kotle jsou převážně určeny pro topenářské a technologické použití. Zařízení určené pro spalování je tvořeno výsypkou paliva nebo pneu-mechanickým pohazováním paliva a díky tomu je možno spalovat černá i hnědá uhlí o výhřevnosti 10 MJ/kg a více.

Rošt kotle se skládá z nosné konstrukce, roštnic a u mechanických roštů je doplněn o hnací ústrojí, u pásových roštů je elektromotor s regulací otáček a u přesuvných roštů se používá hydraulický pohon.

### **Mezi funkce roštu při spalování řadíme:**

- vytváření a udržení požadované vrstvy paliva a následnou prodyšnost + co nejmenší propad paliva
- co nejlepší přívod spalovacího vzduchu do míst roštu tak, aby proces spalování probíhal s ideálním přebytkem vzduchu
- napomáhá k vysušování paliva, dokonalému hoření a dokonalému vyhoření paliva
- hromadí zbytky pro odvod po spalování tuhého paliva
- regulace tepelného výkonu kotle

**Kotle je možno rozčlenit z hlediska jejich funkčnosti a způsobu užití a to:**

- s pevným roštem
- s mechanickým roštem

#### **1.1.1 Kotle s pevným roštem**

Palivo v těchto kotlích prohořívá v původní nasypané vrstvě a zbytky po spalování musí být odstraněny ručně, kotle s touto konstrukcí jsou určeny pro nejmenší výkony. Tento druh konstrukce můžeme nadále rozčlenit na:

##### **1.1.1.1 Pevný rovinný rošt**

Typ tohoto roštu se skládá z desek tvořených litinou s mezerami určenými pro proudění spalovacího vzduchu nebo z roštnic, které jsou umístěny za sebou a mají tvar štíhlých nosníků a jsou vyrobeny ze žárovevné litiny.



### **1.1.1.2 Stupňový rošt**

Rošt je složen ze vstupní nakloněné části, která je tvořena stupňovým roštěm a výstupní části, kterou tvoří rovinný rošt. Litinové roštnice musí být konstrukčně provedeny tak, aby nedocházelo k propadu paliva. Vlivem gravitace dochází k postupnému sesouvání paliva, takže pevná část hořlaviny vyhořívá až na rovinném roštu.

### **1.1.2 Kotle s mechanickým roštěm**

Tento automatický způsob umožňuje mechanický posun paliva v ohništi i jeho následné prohrabování, palivo prohořívá postupně a zbytky po spálení jsou vyneseny také mechanicky.

#### **1.1.2.1 Pásový rošt**

Jako první typ ze skupiny mechanických roštů se uplatnil jako použitelný pro dosažení větších výkonů rošt řetězový, jeho pozdější modifikací je pásový rošt. Značnou nevýhodou u řetězového roštu byla demontáž a následná oprava poškozené roštnice, poněvadž roštnice se skládaly z článků Gallova řetězu, které se musely při následné opravě celé rozebrat.

Naopak u roštu pásového se využívá Gallův řetěz jako tažný i nosný prvek umístěný pouze v bočnicích roštu, a proto s palivem nepříjde do kontaktu. Roštnice u moderních roštů lze vyměňovat i za provozu kotle.

#### **1.1.2.2 Přesuvný rošt**

Lze spalovat i paliva s prachovým podílem. Skládá se ze šikmého stupňovitého roštu, jenž je tvořen z roštnic uspořádaných do vodorovných řad. Liché řady jsou spojeny s vozíky poháněnými přímočaře, které jsou propojeny s elektromotorem nebo hydraulickým válcem. Sudé části jsou pevně spojeny s nosným rámem.

Výkon u tohoto roštu je možno měnit změnou rychlosti roštnic a výškou vrstvy paliva.

### 1.1.3 Vrativý rošt

Výhodou tohoto roštu je dosažení pronikavějšího prolamování vrstvy paliva ve vrstvě. Jejich konstrukce je srovnatelná jako u roštů přesuvných jen s tím rozdílem, že jednotlivé stupně se pohybují v protisměru k pohybu paliva, takže při jejich pohybu dochází k intenzivnímu promíchávání horní žhavé a spodní dosud nezapálené části vrstvy paliva, tím dosáhneme spodního zápalu, lepšího vyhoření. Vyrábějí se ve dvou variantách a to:

- povrch roštu je ve vodorovné rovině (kaskádové)
- povrch roštu v šikmé rovině (Martinovy)

## 2 Ventilátory

Tato kapitola byla zpracována za pomoci literatury [5].

Ventilátory je možno zařadit mezi rotační lopátkové stroje, které slouží k dopravě a stlačení plynů, jelikož poměr stlačení je poměrně nízký, budeme hovořit spíše o dopravě vzdušiny než o jejich stlačování. Za pomoci dynamického účinku lopatek přechází energie ze stroje na vzdušinu. Dnes již drtivá většina investičních celků se neobejde bez specifického ventilátoru, jenž je určen pro překonávání tlakových ztrát při dopravě vzdušiny.

Rozdělit ventilátory lze do několika kritérií a to:

- Podle směru průtoku vzdušiny oběžným kolem
  - Radiální ventilátory.
  - Axiální ventilátory.
  - Diagonální ventilátory.
  - Diametrální ventilátory.
- Podle dopravního tlaku
  - Nízkotlaké.
  - Středotlaké.
  - Vysokotlaké.

## 2.1 Radiální ventilátor

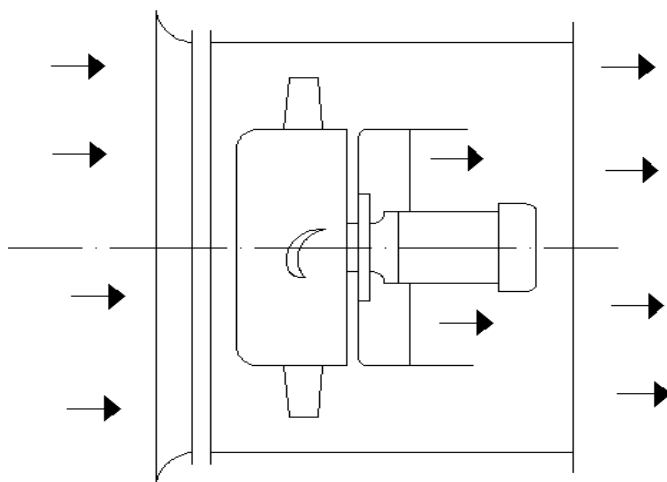
Radiální ventilátor je složen z oběžného kola, kde vzduch vstupuje vodorovně s osou v axiálním směru a výtlak je v tangenciálním směru k oběžnému kolu. Spirální skříň slouží pro zachycení a odvod vzduchu proudícího z rotoru do výtláčného hrdla a také k transformaci kinetické energie dopravované látky na energii tlakovou.

Dle konstrukce lopatek dělíme radiální ventilátory na:

- Dopředu zahnutýma lopatkama.
- Radiálně zahnutýma lopatkama.
- Dozadu zahnutýma lopatkama.

## 2.2 Axiální ventilátor

Užívá se převážně u těch zařízení, kde není vysoká tlaková ztráta. Vzdušina proudí ve směru osy rotace. Základními částmi je rotor s lopatkami a stator. Axiální ventilátor může být opatřen i ochrannou mřížkou, která zabraňuje poškození lopatek. Vzdušina na výstupu z ventilátoru rotuje.



Obr. 2-1 Schéma axiálního ventilátoru

### 3 Základní výpočty

Převážná část této kapitoly je zpracována dle literatury [3].

Stechiometrické výpočty slouží ke zjištění množství vzduchu, které je nutné pro spálení paliva a ke zjištění množství spalin, které tímto spálením vzniknou. Vychází se zde ze základních chemických rovnic, jenž se dále označují za stechiometrické spalovací rovnice. Z pohledu spalování rozlišujeme dva druhy spalování:

- model dokonalého spalování
- model nedokonalého spalování

V této práci se zabýváme modelem dokonalého spalování, poněvadž model nedokonalého spalování počítá s podstechiometrickým množstvím vzduchu, kde  $\alpha < 1$ .

#### Minimální objem kyslíku potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{O_2\min} = 22,39 \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (3 - 1)$$

$$V_{O_2\min} = 22,39 \cdot \left( \frac{0,559}{12,01} + \frac{0,032}{4,032} + \frac{0,0067}{32,06} - \frac{0,0438}{32} \right)$$

$$V_{O_2\min} = 1,1939 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

#### Minimální množství suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VZS\min} = \frac{V_{O_2\min}}{0,2103} \quad (3 - 2)$$

$$V_{VZS\min} = \frac{1,1939}{0,2103}$$

$$V_{VZS\min} = 5,6771 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{VZS\min}$	Minimální množství suchého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{O_2\min}$	Minimální objem kyslíku	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

### Minimální množství vlhkého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZVmin} = v \cdot V_{VZSmin} \quad (3 - 3)$$

$$V_{VZVmin} = 1,03 \cdot 5,6771$$

$$V_{VZVmin} = 5,8474 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{VZVmin}$	Minimální množství vlhkého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{VZSmin}$	Minimální množství suchého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$v$	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	$[-]$

### Skutečný objem suchého vzduchu

$$V_{VZS} = \alpha_K \cdot V_{VZSmin} \quad (3 - 4)$$

$$V_{VZS} = 1,41 \cdot 5,6771$$

$$V_{VZS} = 8,0047 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{VZS}$	Skutečný objem suchého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{VZSmin}$	Množství suchého vzduchu minimálního	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\alpha_K$	Přebytek vzduchu za kotlem	$[-]$

### Objem vzduchu skutečného vlhkého

$$V_{VZV} = v \cdot V_{VZS} \quad (3 - 5)$$

$$V_{VZV} = 1,03 \cdot 8,0047$$

$$V_{VZV} = 8,2448 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{VZV}$	vzduchu skutečného vlhkého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{VZS}$	Objem vzduchu skutečného suchého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$v$	Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	$[-]$

### **Objem oxidu uhličitého**

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r \quad (3 - 6)$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,559$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,0361 [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### **Objem oxidu siřičitého**

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad (3 - 7)$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0067$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,0046 [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### **Objem dusíku**

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,39}{28,016} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{\text{VZS}} \quad (3 - 8)$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,39}{28,016} \cdot 0,0085 + 0,79 \cdot 8,0047$$

$$V_{\text{N}_2} = 6,3305 [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### **Objem kyslíku**

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha_K - 1) \cdot V_{\text{VZVmin}} \quad (3 - 9)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (1,41 - 1) \cdot 5,6771$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,4888 [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### Objem suchých spalin

$$V_{SPS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (3 - 10)$$

$$V_{SPS} = 1,0361 + 0,0046 + 6,3305 + 0,4888$$

$$V_{SPS} = 7,86 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{SPS}$	Objem suchých spalin	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{CO_2}$	Objem oxidu uhličitého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{SO_2}$	Objem oxidu siřičitého	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{N_2}$	Objem dusíku	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{O_2}$	Objem kyslíku	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

### Objem vodní páry ze spalování vodíku z odpařené vlhkosti paliva a z vlhkosti vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{22,39}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,39}{18,016} \cdot W^r + (v - 1) \cdot V_{VZS} \quad (3 - 11)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,032 + \frac{22,39}{18,016} \cdot 0,09 + (1,03 - 1) \cdot 8,0047$$

$$V_{H_2O} = 0,5296 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

### Objem vlhkých spalin z 1kg paliva

$$V_{SPV} = V_{SPS} + V_{H_2O} \quad (3 - 12)$$

$$V_{SPV} = 7,86 + 0,5296$$

$$V_{SPV} = 8,3896 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{SPV}$	Objem vlhkých spalin z 1kg paliva	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{SPS}$	Objem suchých spalin	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{H_2O}$	Objem vodní páry	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

### Objem vlhkých spalin z 1kg paliva při $t_{SP} = 165^{\circ}\text{C}$

$$V_{SPV}^{t_{SP}} = V_{SPV} \cdot \frac{273+t_{SP}}{273} \quad (3-13)$$

$$V_{SPV}^{t_{SP}} = 8,3896 \cdot \frac{273 + 165}{273}$$

$$V_{SPV}^{t_{SP}} = 13,4602 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_{SPV}^{t_{SP}}$	Objem vlhkých spalin z 1kg paliva $t_{SP} = 165^{\circ}\text{C}$	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$V_{SPV}$	Objem vlhkých spalin z 1kg paliva	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$t_{SP}$	Teplota spalin	$[^{\circ}\text{C}]$

### Procentní složení spalin

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{1,0361}{8,3896} \cdot 100 = 12,35 \text{ [%]} \quad (3-14)$$

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{0,0046}{8,3896} \cdot 100 = 0,0548 \text{ [%]} \quad (3-15)$$

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{6,2856}{8,3896} \cdot 100 = 74,9213 \text{ [%]} \quad (3-16)$$

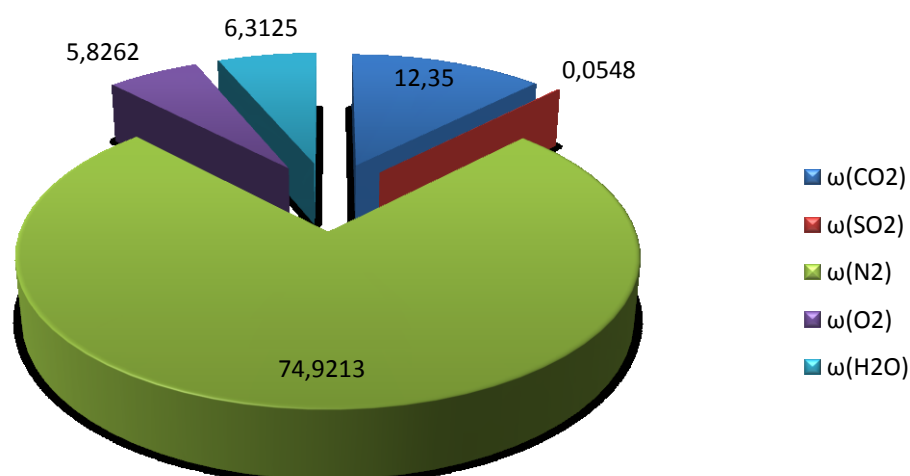
$$\omega_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{0,4888}{8,3896} \cdot 100 = 5,8262 \text{ [%]} \quad (3-17)$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{SPV}} \cdot 100 = \frac{0,5296}{8,3896} \cdot 100 = 6,3125 \text{ [%]} \quad (3-18)$$

$$\sum \omega = 100 \text{ [%]}$$



## Procentní složení spalin



Graf 3-1 Procentní složení spalin

## 4 Výpočet výrobního tepla kotle

Entalpie napájecí vody, přehřáté páry a odluhu byly vypočteny za pomoci výpočtového softwaru EES, kde byly dosazeny zadané parametry a následný výpočet proběhl v okně „solution“ určeném pro daný výpočet. Tento software poskytuje vysokou přesnost stanovení vlastností vody při tlaku až 1000 Mpa za pomoci formulace pro termodynamické vlastnosti obyčejné vody pro obecné a vědecké účely vydané Mezinárodní asociací pro vlastnosti vody a vodní páry (IAPWS).

```
pp=7000
tp=500
hp=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=tp;P=pp)

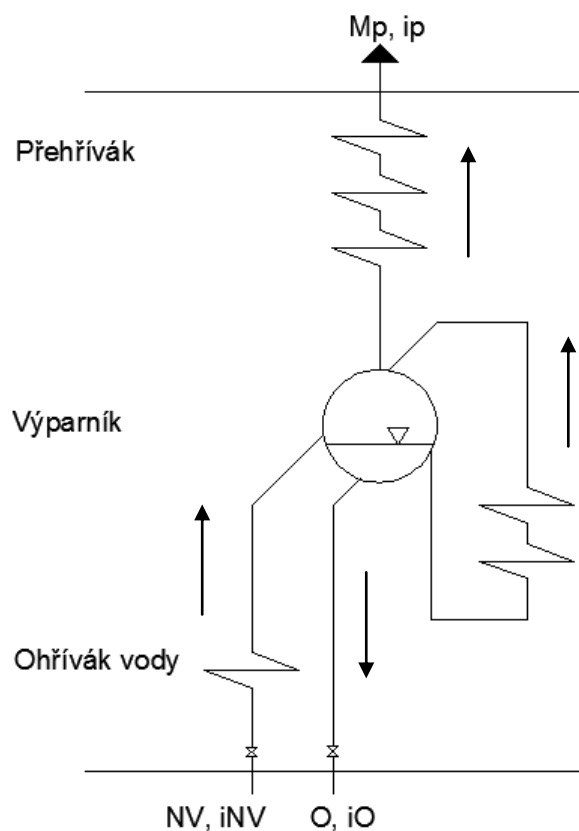
pnv=7000
trnv=120
hnv=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=trnv;P=pnv)

pod=7000
hod=Enthalpy(Steam_IAPWS;x=0;P=pod)|
```

Obr. 4-1 Příkazový řádek softwaru EES

## 4.1 Schéma kotle

Po domluvě s vedoucím bakalářské práce byl tlak v celém kotli stanoven na 7 Mpa a případné ztráty budou zanedbány.



Obr. 4-2 Schéma kotle

## 4.2 Entalpie napájecí vody

Entalpie napájecí vody byla určena výpočtovým programem EES ze zadaných parametrů, kde  $t_p = 120^\circ\text{C}$  a  $p_p = 7\text{MPa}$ .

$$i_{NV} = 508,6 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

### 4.3 Entalpie přehřáté páry

Entalpie přehřáté páry byla určena výpočtovým programem EES ze zadaných parametrů, kde  $t_p = 500^\circ\text{C}$  a  $p_{pp} = 7\text{MPa}$ .

$$i_{pp} = 3411 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### 4.4 Entalpie odluhu

Entalpie odluhu byla určena výpočtovým programem EES ze zadaných parametrů, kde  $p = 7\text{MPa}$ .

$$i_o = 1267 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

### 4.5 Množství odluhu

$$\dot{m}_o = \dot{m}_p \cdot \frac{\sigma}{100} \quad (4 - 1)$$

$$\dot{m}_o = 13,89 \cdot \frac{4}{100}$$

$$\dot{m}_o = 0,5556 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Kde:	$\dot{m}_o$	Množství odluhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$\sigma$	Odluh	$[-]$
	$\dot{m}_p$	Výkon kotle	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

## 5 Výrobní teplo

$$Q_V = \dot{m}_p \cdot (i_{PP} - i_{NV}) + \dot{m}_O \cdot (i_O - i_{NV}) \quad (5 - 1)$$

$$Q_V = 13,89 \cdot (3409 - 508,86) + 0,5556 \cdot (1267,4 - 508,86)$$

$$Q_V = 40704,4 \text{ [kJ} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$Q_V$	Výrobní teplo	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$\dot{m}_p$	Výkon kotle	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$i_{pp}$	Entalpie přehřáté páry	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$i_{NV}$	Entalpie napájecí vody	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$i_O$	Entalpie odluhu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\dot{m}_O$	Množství odluhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

## 6 Měrná tepelná kapacita spalin

Pro výpočet měrné tepelné kapacity spalin (teplota spalin,  $t_{SP} = 165^\circ\text{C}$ ) jsem použil interpolační metodu. Hodnoty středních měrných tepelných kapacit jsem odečetl pomoci literatury [3] **tab. 4-9 Střední měrné tepelné kapacity základních složek spalin.**

$$c_{p\text{CO}_2} = \frac{1,7863 - 1,6996}{200 - 100} \cdot (165 - 100) + 1,6996 = 1,7559 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (6 - 1)$$

$$c_{p\text{SO}_2} = \frac{1,9427 - 1,8631}{200 - 100} \cdot (165 - 100) + 1,8631 = 1,9148 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (6 - 2)$$

$$c_{p\text{N}_2} = \frac{1,2994 - 1,2951}{200 - 100} \cdot (165 - 100) + 1,2951 = 1,2979 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} \quad (6 - 3)$$

$$c_{pO_2} = \frac{1,3372 - 1,3193}{200 - 100} \cdot (165 - 100) + 1,3193 = 1,3309 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

(6 – 4)

$$c_{pH_2O} = \frac{1,5227 - 1,5062}{200 - 100} \cdot (165 - 100) + 1,5062 = 1,5169 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

(6 – 5)

$$c_{psp} = c_{pCO_2} \cdot \omega_{CO_2} + c_{pSO_2} \cdot \omega_{SO_2} + c_{pN_2} \cdot \omega_{N_2} + c_{pO_2} \cdot \omega_{O_2} + c_{pH_2O} \cdot \omega_{H_2O}$$

(6 – 6)

$$c_{psp} = 1,7559 \cdot 0,1235 + 1,9148 \cdot 0,00548 + 1,2979 \cdot 0,749213 + 1,3309 \cdot$$

$$\cdot 0,058262 + 1,5169 \cdot 0,063125$$

$$c_{psp} = 1,3730 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

## 7 Tepelné ztráty kotle

### 7.1 Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce

$$Z_{C_{str}} = \frac{C_{str}}{1 - C_{str}} \cdot X_{str} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{ci}$$

(7 – 1)

$$Z_{C_{str}} = \frac{0,18}{1 - 0,18} \cdot 0,75 \cdot \frac{0,26}{20048} \cdot 32600$$

$$Z_{C_{str}} = 0,02195 [-]$$

## 7.2 Ztráta mechanickým nedopalem v popílku

$$Z_{C_{pop}} = \frac{C_{pop}}{1 - C_{pop}} \cdot X_{pop} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{ci} \quad (7 - 2)$$

$$Z_{C_{pop}} = \frac{0,25}{1 - 0,25} \cdot 0,25 \cdot \frac{0,26}{20048} \cdot 32600$$

$$Z_{C_{pop}} = 0,0352 [-]$$

## 7.3 Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{C_{str}} + Z_{pop} \quad (7 - 3)$$

$$Z_C = 0,02195 + 0,0352$$

$$Z_C = 0,0571 [-]$$

Kde:	$Z_C$	Celková ztráta mechanickým nedopalem	$[-]$
	$Z_{C_{str}}$	Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce	$[-]$
	$Z_{C_{pop}}$	Ztráta mechanickým nedopalem v popílku	$[-]$

## 7.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků je složena stejně jako ztráta mechanickým nedopalem ze ztráty ve strusce, popílku a propadu.

#### 7.4.1 Ztráta fyzickým teplem ve strusce

$$c_{\text{str}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{str}} \quad (7 - 4)$$

$$c_{\text{str}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 600$$

$$c_{\text{str}} = 1,0132 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$Z_{\text{fstr}} = \frac{X_{\text{str}}}{1 - C_{\text{str}}} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_{\text{str}} \cdot t_{\text{str}} \quad (7 - 5)$$

$$Z_{\text{fstr}} = \frac{0,75}{1 - 0,18} \cdot \frac{0,26}{20048} \cdot 1,0132 \cdot 600$$

$$Z_{\text{fstr}} = 0,0072 [-]$$

#### 7.4.2 Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$c_{\text{pop}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{pop}} \quad (7 - 6)$$

$$c_{\text{pop}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 165$$

$$c_{\text{pop}} = 0,7948 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$Z_{\text{fpop}} = \frac{X_{\text{pop}}}{1 - C_{\text{pop}}} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_{\text{pop}} \cdot t_{\text{pop}} \quad (7 - 7)$$

$$Z_{\text{fpop}} = \frac{0,25}{1 - 0,25} \cdot \frac{0,26}{20048} \cdot 0,7948 \cdot 165$$

$$Z_{\text{fpop}} = 0,0006 [-]$$

### 7.4.3 Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{f_{str}} + Z_{f_{pop}} \quad (7 - 8)$$

$$Z_f = 0,0072 + 0,0006$$

$$Z_f = 0,0077 [-]$$

Kde:	$Z_f$	Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$[-]$
	$Z_{f_{str}}$	Ztráta fyzickým teplem ve strusce	$[-]$
	$Z_{f_{pop}}$	Ztráta fyzickým teplem v popílku	$[-]$

### 7.5 Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = (1 - Z_C) \cdot \frac{V_{SPV}^{t_{SP}} \cdot c_{psp} \cdot (t_{sp} - t_o)}{Q_i} \quad (7 - 9)$$

$$Z_k = (1 - 0,0571) \cdot \frac{13,4602 \cdot 1,3730 \cdot (165 - 20)}{20048}$$

$$Z_k = 0,1260 [-]$$

Kde:	$Z_k$	Ztráta citelným teplem spalin	$[-]$
	$Z_C$	Celková ztráta mechanickým nedopalem	$[-]$
	$c_{psp}$	Měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ \cdot m_N^3 \cdot K^{-1}]$
	$Q_i$	Redukovaná výhřevnost paliva	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
	$V_{SPV}^{t_{SP}}$	Objem vlhkých spalin z 1kg paliva	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
	$t_{SP}$	Teplota spalin	$[^{\circ}C]$
	$t_o$	Teplota okolí	$[^{\circ}C]$



## 7.6 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí bere v úvahu velikost tepla, které unikne povrchem kotle. Velikost této ztráty souvisí s oplechováním kotle, s tepelnou izolací a jeho výkonem. Dle literatury [3] **obr. 5-1** Ztráta sdílením tepla do okolí byla stanovena velikost této ztráty na:

$$Z_{SV} = 0,007 [-] \quad (7 - 10)$$

## 7.7 Ztráta chemickým nedopalem

Tato ztráta nabývá vyšších hodnot pouze při hoření s nižší teplotou plamene (spalování dřeva, bio paliv). Při spalování paliv s vyšší výhřevností lze tuto ztrátu zanedbat.

$$Z_{CO} = 0 [-] \quad (7 - 11)$$

## 8 Účinnost kotle

$$\eta_K = (1 - Z_C - Z_f - Z_k - Z_{SV} - Z_{CO}) \cdot 100 \quad (8 - 1)$$

$$\eta_K = (1 - 0,1260 - 0,0077 - 0,0935 - 0,007 - 0) \cdot 100$$

$$\eta_K = 76,6 [\%]$$

Kde:	$\eta_K$	Účinnost kotle	$[-]$
	$Z_C$	Celková ztráta mechanickým nedopalem	$[-]$
	$Z_f$	Celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$[-]$
	$Z_k$	Ztráta citelným teplem spalín	$[-]$
	$Z_{SV}$	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	$[-]$
	$Z_{CO}$	Ztráta chemickým nedopalem	$[-]$

## 9 Množství paliva

### 9.1 Skutečné množství paliva

$$M_{\text{PAL}} = \frac{Q_V}{Q_i \cdot \eta_K} \quad (9 - 1)$$

$$M_{\text{PAL}} = \frac{40704,4}{20048 \cdot 0,8417}$$

$$M_{\text{PAL}} = 2,4121 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$M_{\text{PAL}}$	Skutečné množství paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$Q_V$	Výrobní teplo	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$Q_i$	Redukovaná výhřevnost paliva	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\eta_K$	Účinnost kotle	$[-]$

### 9.2 Množství spáleného paliva

$$M_{\text{pv}} = M_{\text{PAL}} \cdot (1 - Z_C) \quad (9 - 2)$$

$$M_{\text{pv}} = 2,4121 \cdot (1 - 0,0571)$$

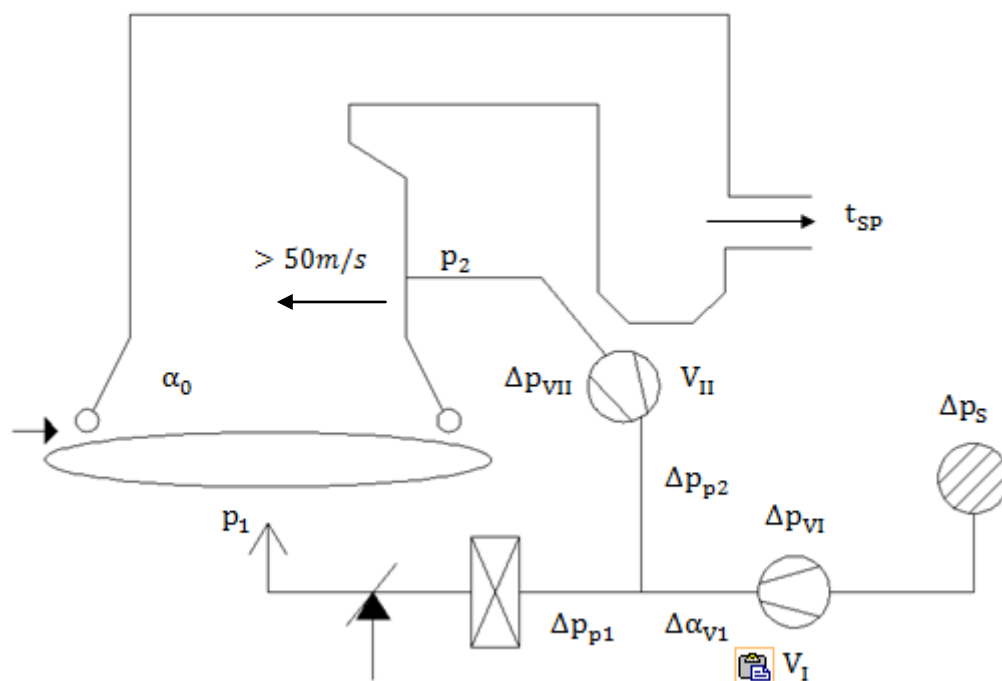
$$M_{\text{pv}} = 2,2743 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$M_{\text{pv}}$	Množství spáleného paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$M_{\text{PAL}}$	Skutečné množství paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
	$Z_C$	Celková ztráta mechanickým nedopalem	$[-]$

## 10 Parametry pro návrh ventilátorů

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [5].

Hlavní funkcí ventilátoru je přenesení energie do dopravované vzdušiny. Ventilátor nemůžeme zrovna nazvat ideálním strojem, neboť u něj můžeme očekávat také mnoho negativních vlastností a to nižší účinnost, velký hluk, abrazi, korozi a vibrace. Jedním z nejdůležitějších cílů je i snaha o co nejlevnější ekonomiku provozu stroje, která je spjata s účinností ventilátorů. Dalším důležitým parametrem je i jejich schopnost regulace v požadovaném rozmezí tlaku a množství dopravované vzdušiny. Dále je to velikost ventilátoru a s tím spojené stavební úpravy respektující velikost prostoru strojovny, s tímto souvisí investiční náklady.



Obr. 10-1 Parametry pro návrh ventilátorů

**Tlak primárního ventilátoru pod roštem kotle**

$$p_1 = 11 \quad [\text{kPa}]$$

**Tlak sekundárního vzduchu před tryskami kotle**

$$p_2 = 40 \quad [\text{kPa}]$$

**Podíl sekundárního vzduchu**

$$X_2 = 20 \quad [\%]$$

**Tlaková ztráta ventilátoru od výtlaku k tryskám sekundárního vzduchu**

$$\Delta p_{p2} = 0,5 \quad [\text{kPa}]$$

**Tlaková ztráta při nasátí vzduchu**

$$\Delta p_s = 0,3 \quad [\text{kPa}]$$

**Tlaková ztráta od výtlaku ventilátoru po rošt kotle**

$$\Delta p_{p1} = 0,45 \quad [\text{kPa}]$$

**Doba odběru elektrické energie**

$$t = 8760 \quad [\text{h}]$$

**Tlaková rezerva**

$$k_{p1} = 1,1 \quad [-]$$

$$k_{p2} = 1,25 \quad [-]$$

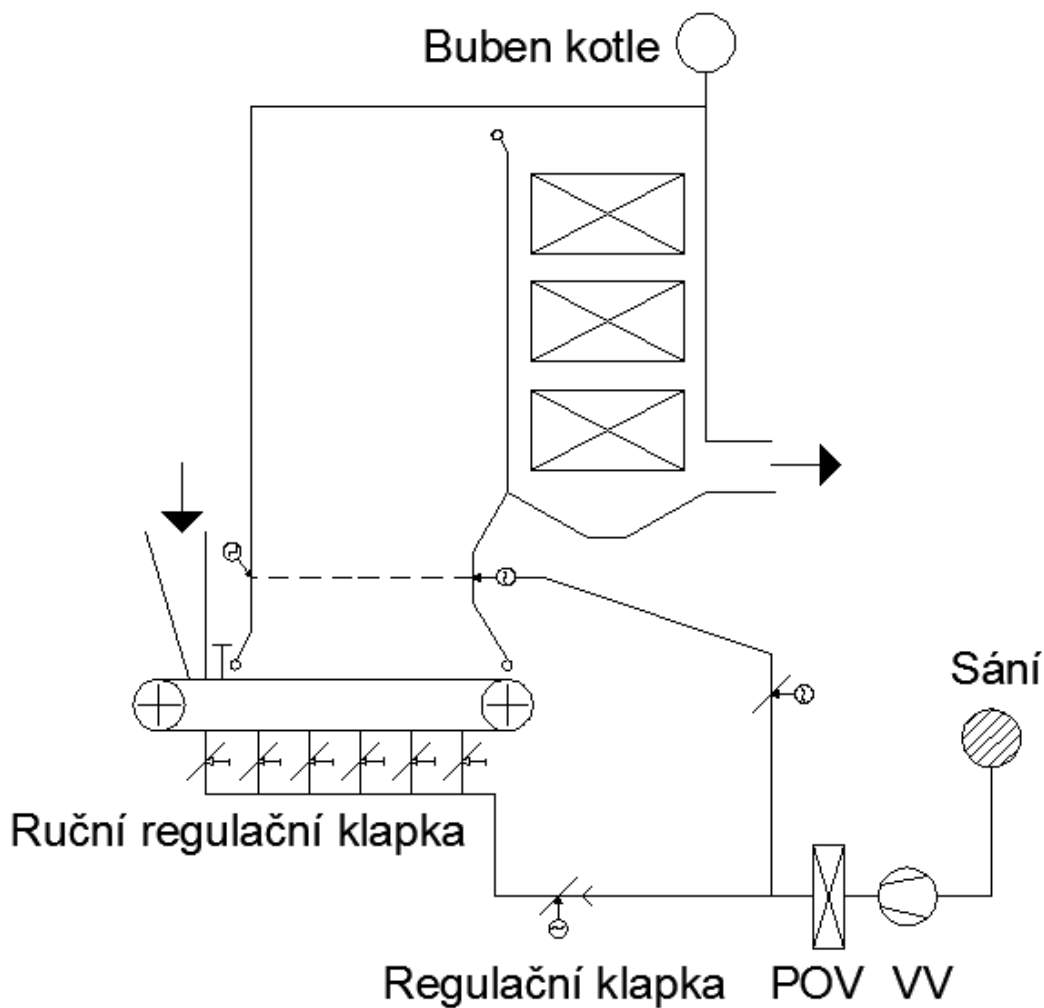
**Rezerva na množství dopravovaného vzduchu**

$$k_{v1} = 1,15 \quad [-]$$

$$k_{v2} = 1,2 \quad [-]$$

## 11 Zapojení bez sekundárního vzduchového ventilátoru

Jedná se o kotel bez ohříváku vzduchu, kde je kotel tvořen membránovými stěnami s utěsněným roštem, spalovací komora je vyrobena z plynotěsných membránových stěn, a proto nedochází k přísátí falešného vzduchu a nedochází zde k žádným ztrátám vzduchu.



Obr. 11-1 Schéma zapojení bez sekundárního vzduchu

## 11.1 Tlak primárního ventilátoru

$$\Delta p_{VI} = p_2 + \Delta p_{p2} + \Delta p_s \quad (11 - 1)$$

$$\Delta p_{VI} = 40 + 0,5 + 0,3$$

$$\Delta p_{VI} = 40,8 \text{ kPa}$$

Kde:  $\Delta p_{VI}$  Zvýšení tlaku primárního ventilátoru [kPa]

$p_2$  Tlak sekundárního vzduchu před dýzami kotle [kPa]

$\Delta p_{p2}$  Tlaková ztráta ventilátoru od výtlačku k tryskám sekundárního vzduchu [kPa]

$\Delta p_s$  Tlaková ztráta při nasátí vzduchu [kPa]

## 11.2 Celkový přebytek vzduchu za kotlem

Protože je kotel svařen z plynotěsných membránových stěn nedochází k žádným ztrátám ani k falešnému nasátí vzduchu, a proto  $\Delta \alpha_0 = 0$  a  $\Delta \alpha_p = 0$ .

$$\Delta \alpha_{V1} = \alpha_0 - \Delta \alpha_0 + \Delta \alpha_p \quad (11 - 2)$$

$$\Delta \alpha_{V1} = 1,3 - 0 + 0$$

$$\Delta \alpha_{V1} = 1,3 [-]$$

Kde:  $\alpha_{V1}$  Celkový přebytek vzduchu za kotlem [-]

$\alpha_0$  Přebytek vzduchu na konci spalovací komory [-]

$\Delta \alpha_0$  Přisátí vzduchu do spalovací komory [-]

$\Delta \alpha_p$  Ztráta vzduchu v potrubí [-]

### 11.3 Množství vzduchu u primárního ventilátoru

$$V_I = \Delta\alpha_{V1} \cdot V_{VZVmin} \quad (11 - 3)$$

$$V_I = 1,3 \cdot 5,8474$$

$$V_I = 7,6016 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_I$	Množství vzduchu u primárního ventilátoru	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\alpha_{V1}$	Celkový přebytek vzduchu za kotlem	$[-]$
	$V_{VZVmin}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

### 11.4 Výkon primárního ventilátoru

$$P_I = V_I \cdot \Delta p_{VI} \quad (11 - 4)$$

$$P_I = 7,6016 \cdot 40,8$$

$$P_I = 310,1453 \text{ [kW]}$$

Kde:	$P_I$	Výkon primárního ventilátoru	[kW]
	$V_I$	Množství vzduchu primárního ventilátoru	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\Delta p_{VI}$	Zvýšení tlaku primárního ventilátoru	[kPa]

## 11.5 Instalovaný příkon primárního ventilátoru

Po dohodě s vedoucím bakalářské práce byla rezerva množství dopravovaného vzduchu stanovena na  $k_{v1} = 1,1$  a tlaková rezerva  $k_{p1} = 1,15$ . Účinnost ventilátoru byla zvolena dle literatury [5] na  $\eta_V = 85\%$

$$P_{PI} = \frac{P_I}{\eta_V} \cdot k_{v1} \cdot k_{p1} \quad (11 - 5)$$

$$P_{PI} = \frac{310,1453}{0,85} \cdot 1,1 \cdot 1,15$$

$$P_{PI} = 461,5691 [kW]$$

Kde:	$P_{PI}$	Instalovaný příkon primárního ventilátoru	[kW]
	$P_I$	Výkon primárního ventilátoru	[kW]
	$\eta_V$	Účinnost ventilátoru	[%]
	$k_{p1}$	Tlaková rezerva	[—]
	$k_{v1}$	Rezerva na množství dopravovaného vzduchu	[—]

## 11.6 Příkon primárního ventilátoru

$$P_{PI*} = \frac{P_I}{\eta_V} \quad (11 - 6)$$

$$P_{PI*} = \frac{310,1453}{0,85}$$

$$P_{PI*} = 364,8768 [kW]$$

Kde:	$P_{PI*}$	Příkon primárního ventilátoru	[kW]
	$P_I$	Výkon primárního ventilátoru	[kW]
	$\eta_V$	Účinnost ventilátoru	[%]



## 11.7 Roční spotřeba elektrické energie primárního ventilátoru

Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce byla doba odběru elektrické energie stanovena na 1 rok, to je 8760 hodin.

$$W_I = P_{PI*} \cdot t \quad (11 - 7)$$

$$W_I = 364,8768 \cdot 8760$$

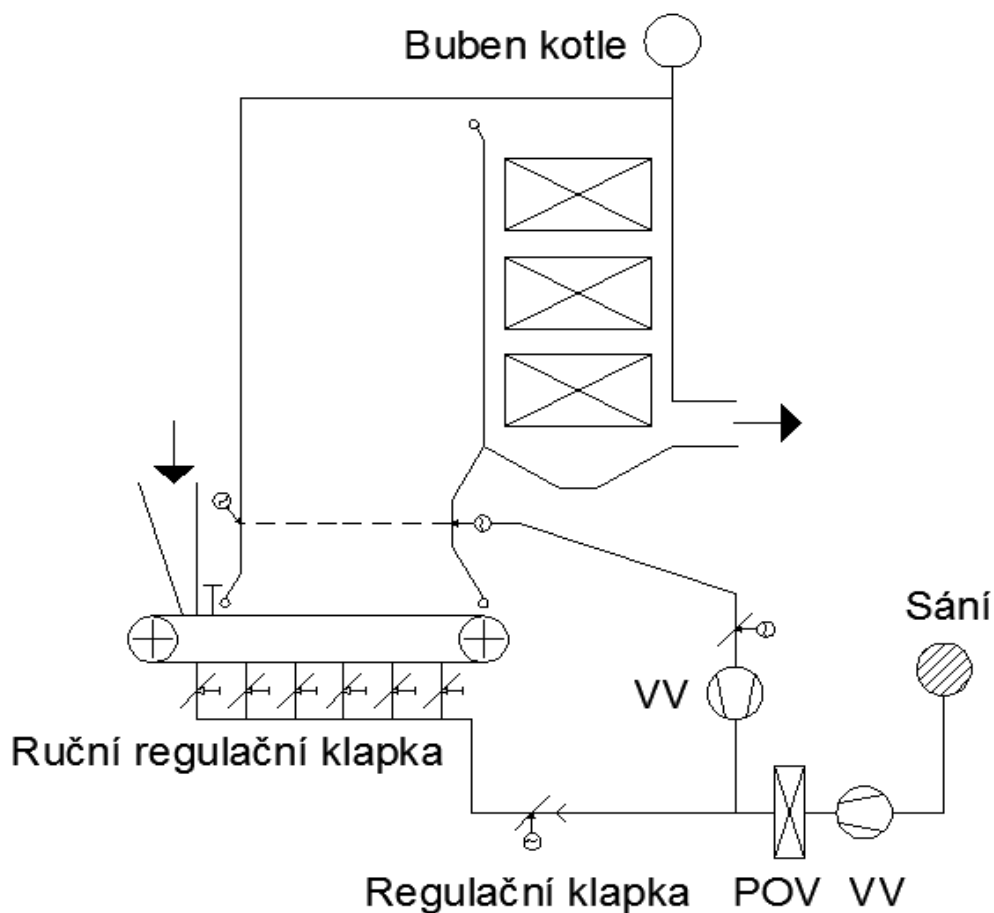
$$W_I = 3196,3207 \text{ kWh}$$

Kde:  $W_I$  Spotřeba elektrické energie primárního ventilátoru [kWh]

$P_{PI*}$  Příkon primárního ventilátoru [kW]

$t$  Doba odběru elektrické energie [h]

## 12 Zapojení se sekundárním vzduchovým ventilátorem



Obr. 12-2 Schéma zapojení se sekundárním ventilátorem

## 12.1 Tlak primárního ventilátoru

$$\Delta p_{V1} = p_1 + \Delta p_{p1} + \Delta p_S \quad (12 - 1)$$

$$\Delta p_{V1} = 11 + 0,45 + 0,3$$

$$\Delta p_{V1} = 11,75 \text{ kPa}$$

Kde:  $\Delta p_{V1}$  Zvýšení tlaku primárního ventilátoru [kPa]

$p_1$  Tlak primárního vzduchu pod roštem kotle [kPa]

$\Delta p_{p1}$  Tlaková ztráta od výtlaku ventilátoru po rošt kotle [kPa]

$\Delta p_S$  Tlaková ztráta při nasátí vzduchu [kPa]

## 12.2 Tlak sekundárního ventilátoru

$$\Delta p_{V2} = p_2 - (p_1 + \Delta p_{p1}) + \Delta p_{p2} \quad (12 - 2)$$

$$\Delta p_{V2} = 40 - (11 + 0,45) + 0,5$$

$$\Delta p_{V2} = 29,0500 \text{ [kPa]}$$

Kde:  $\Delta p_{V2}$  Zvýšení tlaku sekundárního ventilátoru [kPa]

$p_2$  Tlak sekundárního vzduchu před tryskami kotle [kPa]

$p_1$  Požadovaný tlak pod roštem [kPa]

$\Delta p_{p1}$  Tlaková ztráta mezi výtlakem primárního ventilátoru  
a roštem kotle [kPa]

$\Delta p_{p2}$  Tlaková ztráta mezi výtlakem primárního ventilátoru  
po trysky kotle [kPa]

### 12.3 Množství vzduchu u primárního ventilátoru

$$V_1 = \Delta\alpha_{V1} \cdot V_{VZVmin} \quad (12 - 3)$$

$$V_1 = 1,3 \cdot 5,8474$$

$$V_1 = 7,6016 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_1$	Množství vzduchu primárního ventilátoru	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\alpha_{V1}$	Celkový přebytek vzduchu za kotlem	$[-]$
	$V_{VZVmin}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

### 12.4 Množství vzduchu u sekundárního ventilátoru

Po dohodě s vedoucím bakalářské práce byl stanoven podíl sekundárního vzduchu na  $X_2 = 20\%$ .

$$V_2 = \Delta\alpha_{V1} \cdot V_{VZVmin} \cdot X_2 \quad (12 - 4)$$

$$V_2 = 1,3 \cdot 5,8474 \cdot 0,2$$

$$V_2 = 1,5280 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Kde:	$V_2$	Množství vzduchu sekundárního ventilátoru	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\alpha_{V1}$	Celkový přebytek vzduchu za kotlem	$[-]$
	$V_{VZVmin}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$X_2$	Podíl sekundárního vzduchu	$[\%]$

## 12.5 Výkon primárního ventilátoru

$$P_1 = V_1 \cdot \Delta p_{V1} \quad (12 - 5)$$

$$P_1 = 7,6016 \cdot 11,75$$

$$P_1 = 89,3188 \text{ [kW]}$$

Kde:	$P_1$	Výkon primárního ventilátoru	[kW]
	$V_1$	Množství vzduchu primárního ventilátoru	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\Delta p_{V1}$	Zvýšení tlaku primárního ventilátoru	[kPa]

## 12.6 Výkon sekundárního ventilátoru

$$P_2 = V_2 \cdot \Delta p_{V2} \quad (12 - 6)$$

$$P_2 = 1,5280 \cdot 29,0500$$

$$P_2 = 44,3884 \text{ [kW]}$$

Kde:	$P_2$	Výkon sekundárního ventilátoru	[kW]
	$V_2$	Množství vzduchu sekundárního ventilátoru	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\Delta p_{V2}$	Zvýšení tlaku sekundárního ventilátoru	[kPa]

## 12.7 Instalovaný příkon primárního ventilátoru

$$P_{P1} = \frac{P_1}{\eta_V} \cdot k_{v1} \cdot k_{p1} \quad (12 - 7)$$

$$P_{P1} = \frac{89,3188}{0,85} \cdot 1,1 \cdot 1,15$$

$$P_{P1} = 132,9273 [kW]$$

Kde:	$P_{P1}$	Instalovaný příkon primárního ventilátoru	[kW]
	$P_1$	Výkon primárního ventilátoru	[kW]
	$\eta_V$	Účinnost ventilátoru	[kW]
	$k_{p1}$	Tlaková rezerva	[–]
	$k_{v1}$	Rezerva na množství dopravovaného vzduchu	[–]

## 12.8 Instalovaný příkon sekundárního ventilátoru

Z důvodu uvedení kotle do provozu a následného seřízení z hlediska účinnosti a spalování emisí byla rezerva na množství dopravovaného vzduchu stanovena na  $k_{v2} = 1,25$  a tlaková rezerva  $k_{p2} = 1,2$ . Účinnost ventilátoru byla zvolena dle literatury [5] na  $\eta_V = 85\%$

$$P_{P2} = \frac{P_2}{\eta_V} \cdot k_{v2} \cdot k_{p2} \quad (12 - 8)$$

$$P_{P2} = \frac{44,3884}{0,85} \cdot 1,25 \cdot 1,2$$

$$P_{P2} = 78,3325 [kW]$$

Kde:	$P_{P2}$	Instalovaný příkon sekundárního ventilátoru	[kW]
	$P_2$	Výkon sekundárního ventilátoru	[kW]
	$\eta_V$	Účinnost ventilátoru	[kW]
	$k_{p2}$	Tlaková rezerva	[–]
	$k_{v2}$	Rezerva na množství dopravovaného vzduchu	[–]

## 12.9 Příkon primárního ventilátoru

$$P_{P1*} = \frac{P_1}{\eta_V} \quad (12 - 9)$$

$$P_{P1*} = \frac{89,3188}{0,85}$$

$$P_{P1*} = 105,0809 \text{ [kW]}$$

Kde:	$P_{P1*}$	Příkon primárního ventilátoru	[kW]
	$P_1$	Výkon primárního ventilátoru	[kW]
	$\eta_V$	Účinnost ventilátoru	[%]

## 12.10 Příkon sekundárního ventilátoru

$$P_{P2*} = \frac{P_2}{\eta_V} \quad (12 - 10)$$

$$P_{P2*} = \frac{44,3884}{0,85}$$

$$P_{P2*} = 52,2216 \text{ [kW]}$$

Kde:	$P_{P2*}$	Příkon sekundárního ventilátoru	[kW]
	$P_2$	Výkon sekundárního ventilátoru	[kW]
	$\eta_V$	Účinnost ventilátoru	[%]

### 12.11 Roční spotřeba elektrické energie primárního ventilátoru

Doba, po kterou bude odebírán elektrický proud, byla zvolena na 8760 hodin.

$$W_1 = P_{P1*} \cdot t \quad (12 - 11)$$

$$W_1 = 105,0809 \cdot 8760$$

$$W_1 = 920,5086 \text{ GWh}$$

Kde:  $W_1$  Spotřeba elektrické energie primárního ventilátoru [kWh]

$P_{P1*}$  Příkon primárního ventilátoru [kW]

$t$  Doba odběru elektrické energie [h]

### 12.12 Roční spotřeba elektrické energie sekundárního ventilátoru

$$W_2 = P_{P2*} \cdot t \quad (12 - 12)$$

$$W_2 = 52,2216 \cdot 8760$$

$$W_2 = 457,4612 \text{ GWh}$$

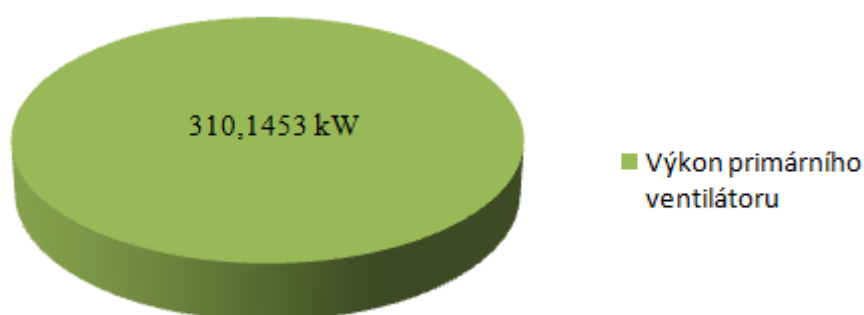
Kde:  $W_2$  Spotřeba elektrické energie sekundárního ventilátoru [kWh]

$P_{P2*}$  Příkon sekundárního ventilátoru [kW]

$t$  Doba odběru elektrické energie [h]

## 13 Analýza

Na základě schématu **Obr. 11-1** zapojení primárního vzduchového ventilátoru a daných parametrů byl vypočítán jeho výkon, který činí  $P_1 = 310,1453 \text{ kW}$ , a posléze i instalovaný příkon  $P_{P1} = 461,5691 \text{ kW}$ . Po připojení sekundárního ventilátoru nám klesne výkon na primárním ventilátoru na  $P_1 = 89,3188 \text{ kW}$  a instalovaný příkon klesne na  $P_{P1} = 132,9273 \text{ kW}$ , u sekundárního ventilátoru výkon čítá hodnotu výkonu  $P_2 = 44,3884 \text{ kW}$  a instalovaného příkonu  $P_{P2} = 78,3325 \text{ kW}$ .



Graf 13-1 Výkon primárního ventilátoru v zapojení bez sekundárního ventilátoru

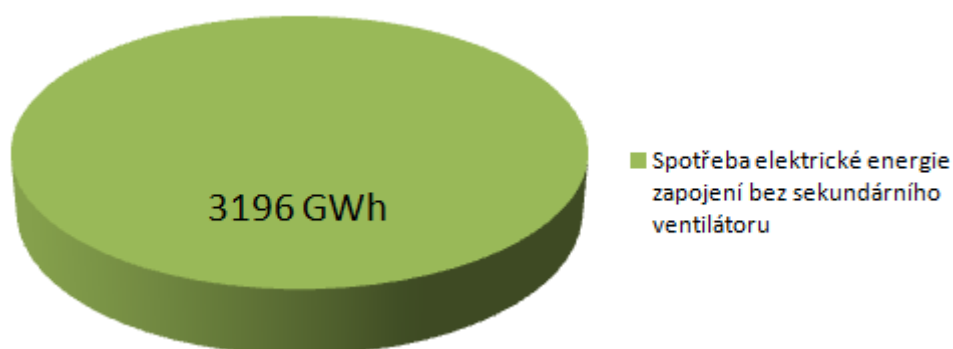


Graf 13-2 Výkon ventilátorů v zapojení se sekundárním ventilátorem

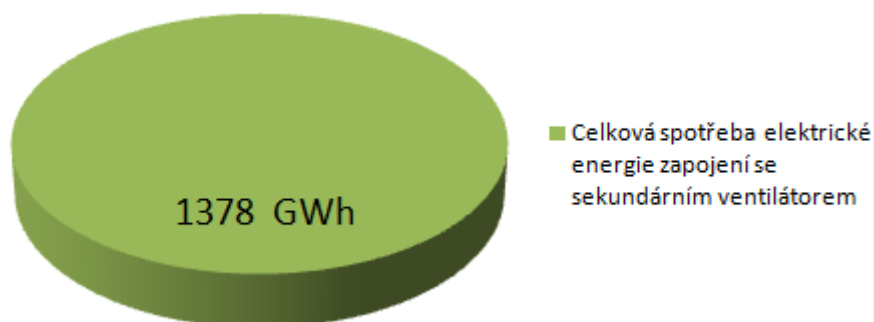


Z grafů velikostí výkonů **Graf 13-1 a Graf 13-2** je patrné, že při zapojení ventilátoru sekundárního vzduchu dosáhne se menšího celkového výkonu.

Při dnešních cenách energií je jedním z nejdůležitějších faktorů velikost spotřeby elektrické energie, která je porovnána pomocí grafu celkové spotřeby elektrické energie **Graf 13-3 a Graf 13-4**, kde je zcela evidentní, že výhodnější zapojení z hlediska velikosti spotřeby elektrické energie je volba zapojení se sekundárním ventilátorem **Obr. 11-2**.



Graf 13-3 Spotřeba elektrické energie zapojení bez sekundárního ventilátoru



Graf 13-4 Spotřeba elektrické energie zapojení se sekundárním ventilátorem

## 14 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo porovnat dva druhy řazení ventilátorů, konkrétně bez sekundárního ventilátoru a se sekundárním ventilátorem, z hlediska velikostí jejich spotřeby elektrické energie.

V teoretické části je popsána oblast týkající se kotlů pro spalování tuhých paliv, kde je bližší rozdělení kotlů s roštovými ohništi a následuje stručný popis funkčnosti ventilátorů a jejich dělení.

Následně z výchozích hodnot paliva a zadaných parametrů kotle byla vypočtena stechiometrie a tepelné ztráty, které byly zapotřebí pro výpočet celkové účinnosti kotle, který je zkonstruován bez ohříváku vzduchu a s utěsněným roštem, aby zde nedocházelo k falešnému přísátí vzduchu. Spalovací komora je sestavena z plynotěsných membránových stěn. Celé zařízení je uloženo na nosnících roštu, takže kotel dilatuje směrem nahoru.

Následné výpočty pro porovnání dvou druhů řazení ventilátoru s odlišnými parametry, kde v případě primárního ventilátoru musí být tlak vzduchu před kotlem dimenzován na maximální velikost 40 kPa a množství vzduchu při přebytku 1,3. Při použití zapojení se sekundárním ventilátorem je primární ventilátor nastaven na 100 % průtok vzduchu, ale tlak odpovídá hodnotě tlaku pod kotlem, která činí 11 kPa. Sekundární ventilátor je dimenzován na 20 % průtok vzduchu a na zvýšení tlaku tak, aby se dosáhlo tlaku 40 kPa před tryskami sekundárního ventilátoru.

Z analýzy je zřejmé, že výhodnější zapojení je se zapojením ventilátoru sekundárního vzduchu, kde nám značně klesá velikost výkonu a příkonu a s tím související velikost spotřeby elektrické energie.

Bakalářská práce není zaměřena pro vypracování rozpočtu pro pořízení těchto ventilátorů, ale do celkového hodnocení je třeba zahrnout kromě spotřeby elektrické energie i ekonomické náklady. V případě zapojení se sekundárním ventilátorem, bude primární ventilátor vzduchu vzhledem k nižšímu tlaku lacinější a jeho rozměry budou menší, navíc se musí započítat náklady na zapojení sekundárního ventilátoru včetně jeho uložení. Dá se očekávat, že u tohoto zapojení budou pořizovací náklady vyšší, ale vzhledem ke značné úspoře elektrické energie lze počítat s krátkou dobou návratnosti.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi za ochotu, trpělivost a odborné vedení při psaní mé bakalářské práce.

## 15 Seznam použité literatury

- [1] VILIMEC, L.. *Stavba kotlů I*. OSTRAVA: VŠB - TU, 2002. 116 s.
- [2] VILIMEC, L. *Stavba kotlů II*. OSTRAVA: VŠB - TU, 1999. 151 s.
- [3] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. PRAHA: ČVUT, 2007. 212 s.
- [4] ČERNÝ, V. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983. 858 s.
- [5] NOVÝ, R. *Ventilátory*. Praha: ČVUT, 1993. 101 s.